第 41 卷　第 2 期　　天 文 学 进 展　　Vol. 41,　No. 2
2023 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Jun., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.02.09

基于插值方法的天线背架结构热分析

李　旺[1]，付　丽[2,4]，王　旭[1]，刘海明[3]，刘庆会[2,4]，唐健森[1]

(1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074；　2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；　3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司，重庆 400067；　4. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210008)

摘要： 大型射电望远镜的天线背架具有结构复杂和节点多等特点，若能够较为精确地重构天线背架的温度场，将对背架热变形等分析有很大帮助。通过在天线结构上安装一定数目的传感器，测量指定位置的温度值，利用距离反比加权插值方法与这些离散的温度值来重构天线背架的温度场，并对不同姿态下的温度场进行分析。而距离反比加权插值效果与距离计算方式、距离方次以及搜索半径相关，以交叉验证的方式对距离反比加权插值方法进行了优化，使精度优于 0.5℃。另外，通过插值方法可得出任意时刻的背架温度场，并对不同状态下的背架温度场进行分析，得出影响温度场分布的因素，以及不同方向温差对天线造成的焦距误差与指向误差。

关　键　词： 温度传感器；插值方法；插值精度；温度场；温差

中图分类号： P111.44　　　**文献标识码：** A

1　引　言

温度是影响望远镜性能的重要因素之一。尤其是射电望远镜天线的背架结构，不仅结构复杂，而且结构的热变形会导致天线主面面形误差、焦距误差和指向误差等[1]。因此，有必要对背架结构的温度场展开研究，为提高望远镜性能提供参考。温度传感器虽然测量精度高，但是对背架上的所有节点进行测量是不现实的。

常用的插值方法有多项式插值方法、距离反比加权插值方法以及 Kriging 插值方法等[2]，由于距离反比加权插值方法操作简单，效果较好，在各个领域中得到应用，包括在天线反射温度场重构中也有应用，所以本文选择此方法对 TM65m 背架结构节点温度进行插值研究。Greve 等人[3]利用距离反比加权插值方法得出背架结构所有节点的温度数据，进而进行有限元计算，基于计算结果改进了 IRAM30m 望远镜焦距误差和面形误差。连培园等人[4]将这种方法插值所得的温度场作为参考，验证了其研究的一种轴对称反射面天线温度场实时预估

收稿日期： 2022-05-11；　**修回日期：** 2022-06-09

资助项目： 国家重点研发计划 (2018YFA0404702)；国家自然科学基金 (12273097，Y787111002，Y347201001，11873015)

通讯作者： 付丽，fuli@shao.ac.cn

方法的重构效果。封志明等人[5]考虑了幂指数的影响，对几种插值方法的结果进行了对比分析，并对距离反比法的幂指数进行优化，提升了插值精度。何涛等人[6]从趋势面、变差函数的变程以及取点方案三方面对距离反比法做了改进，提高了该方法的计算精度及其适应性。

本文基于国内外研究基础，通过优化距离反比加权插值方法中的幂指数及距离的计算方式，提升了插值计算的精度。插值重构了天线背架结果在不同姿态以及环境条件下的温度场，分析了各种因素对温度分布的影响，进而对背架径向和高度方向上的温差所引起的焦距误差与指向误差进行估计。研究内容将为进一步的天线焦距和指向误差的实时修正奠定基础。

2 温度测量系统

2020 年 6 月和 2021 年 8 月，我们陆续在 TM65m 天线背架结构的上弦面上安装了共计 60 个温度传感器 (安装位置见图 1)，建立了结构温度测量系统。该系统由温度传感器、数据采集器、工控机、电缆及温度记录和显示程序等组成。温度传感器选用 1/3B 精度等级的 Pt100 型热电阻传感器，在 $-70°C \sim 30°C$ 范围内精度为 $\pm 0.15°C$。采集器选用 ZJ1064 多点温度测试仪，最多可同时配接 64 点温度传感器，精度为 0.1 级；采集器放置在天线馈源舱的机架上，通过 485 接口和工控机相连，在观测室通过远程登录可查看和读取温度数据。

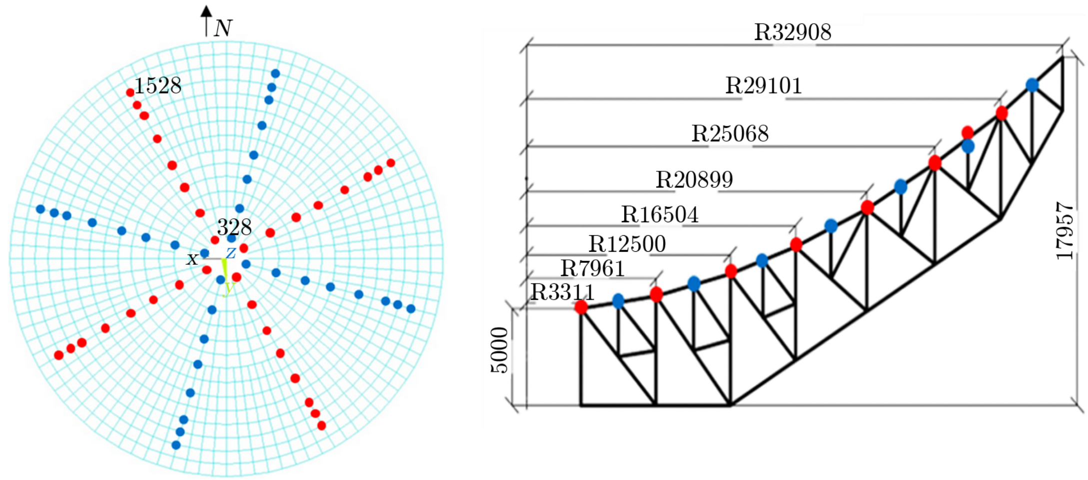


图 1　背架上弦面温度传感器安装位置示意图

该套系统首先在实验室进行了精度测试 (见图 2)，包括相同条件下的传感器精度测试及电缆长度和型号对精度影响测试，测试结果显示传感器精度满足要求，但防水性较差；南洋电缆厂电缆线的长度对测量精度无影响。因此，系统最终选用了南洋电缆厂生产的电缆线，同时选购了具有防水功能的 Pt100 温度传感器。

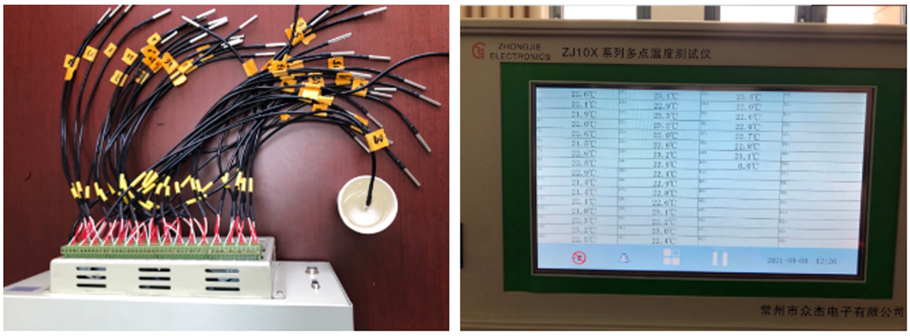


图 2 温度传感器采集系统实验室校准测试

3 距离反比加权插值方法原理及插值精度的优化

天马望远镜的背架结构上共有 1 800 个节点，目前在背架的上弦面上安装了 60 个温度传感器，本文将基于这些传感器，采用距离反比加权插值方法获得整个背架结构的温度场。

3.1 距离反比加权插值方法原理

距离反比加权插值方法的原理是：对与待插值点相邻的待定区域内所有已知点进行加权求平均值，来求得待插值点的数值。每个节点的权值由待插值点与该点的距离确定，其大小是距离 k 次方的倒数，即

$$Z_p = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n_p} \frac{Z_i}{(d_i+\varepsilon)^k}}{\sum\limits_{i=1}^{n_p} \frac{1}{(d_i+\varepsilon)^k}} \quad , \tag{1}$$

式中，Z_p 是待插值点 p 处的温度；Z_i 为插值点邻域内传感器 i 的温度；d_i 为待插值点 p 与其邻域内传感器 i 的距离；n_p 为点 p 邻域中传感器数目；k 是距离的方次；ε 是一个比较小的数，为了避免 d_i 过小而产生数值奇异，本文取 0.01。

影响距离反比插值效果的因素有两个：距离的方次 k 和搜索半径 r。k 值不能太大，也不能太小，太小接近 0 时，通过插值算法得到的结果会与样本的平均几乎一样；如果太大，则插值计算得到的数值与距离该点最近的已知点的值差不多。搜索半径 r 的大小则决定了在这个范围内已知数值的采样点的个数 n_p。r 通常取无穷大，即所有传感器均参与插值，k 可经过优化适当选择。

3.2 距离反比加权插值公式中参数的优化

在插值方法的优化中，主要考虑式 (1) 中的幂指数 k 和距离 d_i。

在距离反比加权插值方法中，权重的选择直接关系到插值的精度，因此幂指数 k 的选取十分关键。本文根据节点温度的均方根误差 (RMS) 最小的选择标准，运用交叉验证的方法对幂指数进行优化选择。即移去一个已知传感器的数据，用其他传感器的数据来进行插

值计算，通过改变幂指数 k 的大小得出该点的温度值，并与传感器所测的数据进行对比分析，确定合适的幂指数 k。本文移除节点 1 480 位置处的传感器 60，将此节点作为未知点用其余 59 个传感器所测的数据进行插值，在取不同幂指数 k 时，得到对比结果 (见图 3)。选取 2021 年 12 月 22 日的数据进行分析，从图中可以看出当 $k \geqslant 4$ 时，插值结果与实际节点温度较为吻合；而 $k < 4$ 时，节点的插值温度与实际温度相比误差较大，其中虚线对应曲线为传感器实测数据，其余的曲线为插值所得结果。我们分别取 $k = 1$, 2, 3, 4, 6, 8, 12 进行计算，得到的 RMS 分别为 1.64°C, 0.77°C, 0.49°C, 0.44°C, 0.43°C, 0.43°C, 0.43°C，可知 $k \geqslant 4$ 的精度能够达到 0.43°C。

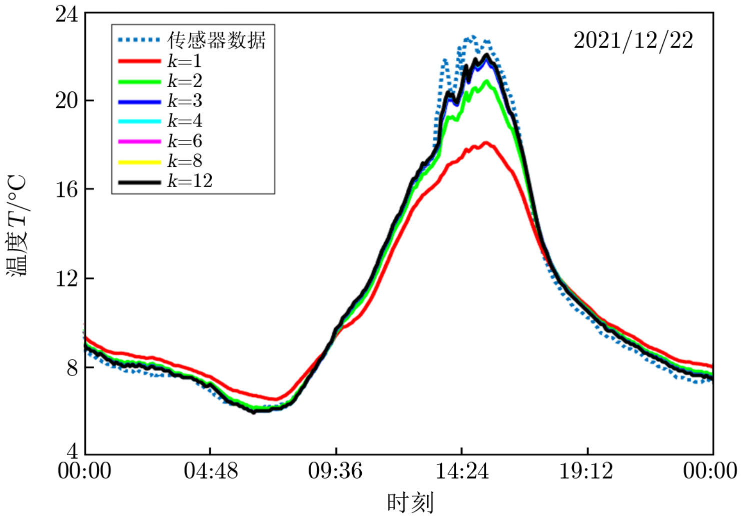


图 3　取不同 k 值的插值结果与测量数据对比情况

d_i 为待插值点 p 与其邻域内传感器 i 的距离，本文进行了四种距离计算方式的比较，即两点间 x 方向、y 方向、z 方向的距离和两点间的距离，d_i 的取值可表达为以下四种情况：

$$d_i = |x_i - x_p| \quad , \tag{2}$$

$$d_i = |y_i - z_p| \quad , \tag{3}$$

$$d_i = |z_i - z_p| \quad , \tag{4}$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} \quad . \tag{5}$$

在确定 k 的基础上，同理移去一个已知传感器的数据，分别代入不同的 d_i，用其他传感器的数据来进行插值计算，最后对比传感器所测数据来确定 d_i 的计算方式。对比结果如图 4 所示，从图中可以看出当 d_i 的取值方式为式 (5) 时，插值结果与实际节点温度吻合得较好。

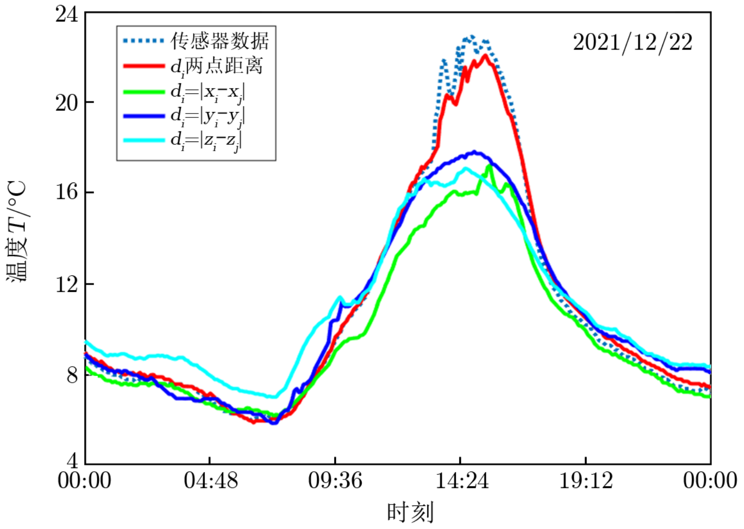


图 4 $k = 4$ 在不同取值方式下的插值结果与测量数据对比情况

4 实验结果与分析

经优化计算后，确定了插值公式中的 k 和 d，即 k 取 4，d_i 按式 (5) 计算，利用距离反比加权插值方法计算背架所有节点处的温度值。首先依次以每个温度传感器作为验证节点，采用交叉验证的方式，验证插值精度；然后用已知传感器温度插值得到背架上弦温度场，对比分析温度分布与太阳高度角、太阳方位角、天线方位角以及天线俯仰角的关系。

4.1 插值精度验证

选取 2021 年 12 月 9 日的数据用于精度验证。图 1 给出天线背架结构的上弦面共计 60 个温度传感器布局，分别移除待验证的传感器，利用剩余 59 个传感器去插值得出待验证传感器对应节点的温度，再与传感器所测温度比较，得出插值温度的均方根误差 RMS (见图 5)，用于精度评估。计算的插值结果与不同传感器的实测温度的对比见图 6。从图 6 中可以看出插值所得温度与传感器实测温度接近，由图 5 中计算的 RMS 可知，均方根温差集中在 0°C ∼ 0.3°C，最大为 0.44°C，不超过 0.5°C，即本文所述插值方法的精度优于 0.5°C。

4.2 背架结构温度场

首先根据式 (5) 计算各待插值点分别到 60 个传感器所在节点的距离 d_i；再基于温度传感器的测量数据，由式 (1) 可计算出天线背架结构上所有节点的温度值。经插值计算分析了 TM65m 在不同方位角和俯仰角、太阳不同方位和高度角、不同风速及晴天和雨天等条件下背架结构的温度场。图 1 为望远镜方位角 0° 和俯仰角 88° 时背架结构的俯视图，节点 328 和 1 528 在西北侧，后面的云图中将以这两个节点的位置和坐标轴 (定义当望远镜方位角 0° 并指向天顶时，Y 轴指向正南，X 轴指向正西) 的变化为参考，辅助分析太阳光线与背架节点的关系。分析中选取了具有代表性的数据：2021 年 12 月 4 日、12 月 15 日以及 2022 年

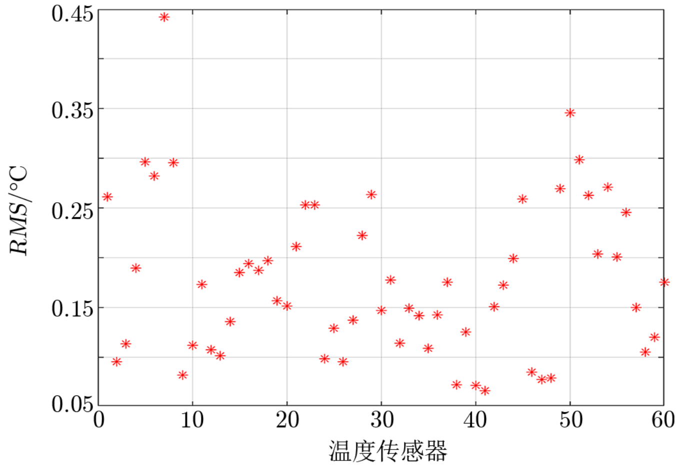


图 5　交叉验证传感器插值精度

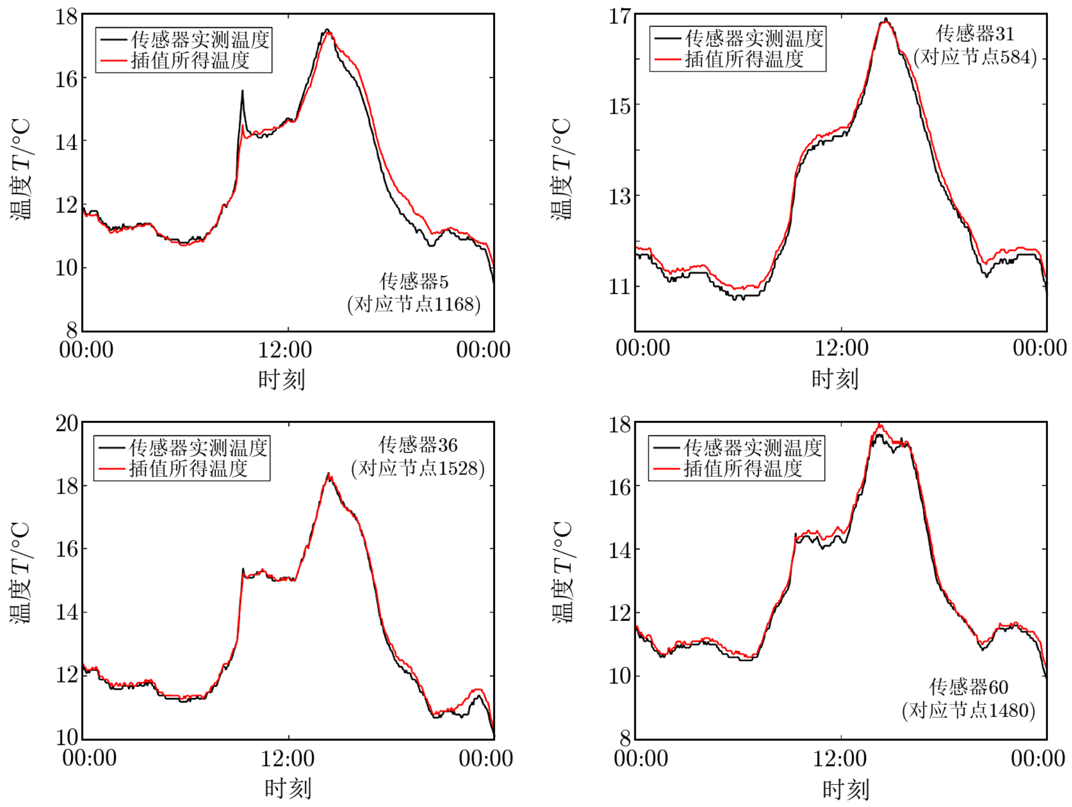


图 6　计算的插值结果与不同的传感器实测温度对比

3 月 1 日某时刻数据。

在确定太阳位置时，假定太阳处在中心与观察点重合的，半径足够大的球形天空 (天球) 中，采用常用的地平坐标系来确定太阳在天球上所处的位置，如图 7 所示，太阳的位置以太阳高度角 β_s、方位角 α_s 表示。

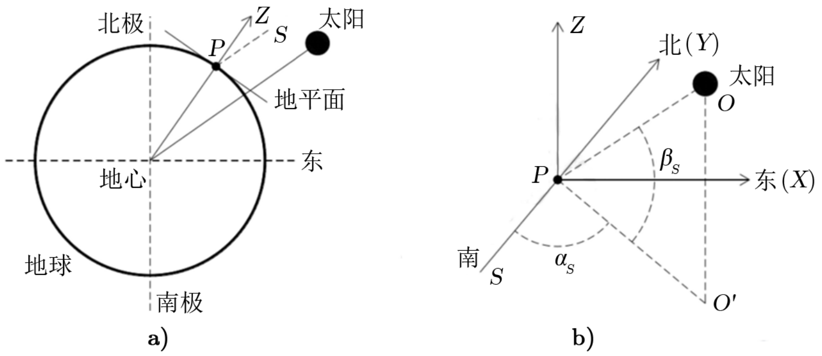
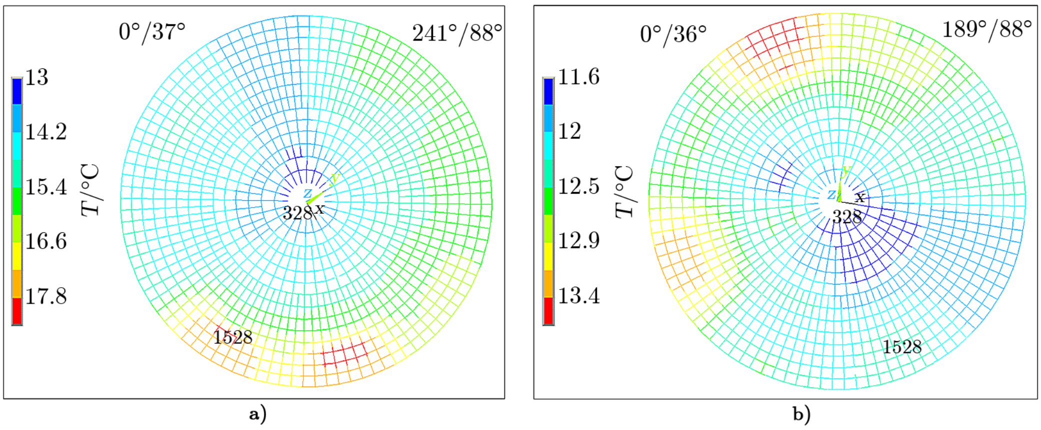


图 7　地平坐标系

图 7 中太阳高度角为地面观察点 P 向太阳中心作射线 PO，PO 与其在地平坐标系上的投影线 PO' 的夹角，用 β_s 表示，太阳高度角的变化范围为 0° ~ 90°；太阳方位角为投影线 PO' 与观察点向正南方向的射线 PS 之间的夹角，用 α_s 表示，规定正南方向为 0°，向西取正值，向东取负值，变化范围为 −180° ~ +180° [7]。

2021 年 12 月 4 日 12:00，阴天，东北风 3 ~ 4 级，天马望远镜处于静止，天线为朝天状态，方位角为 241°，太阳高度角为 37°，太阳方位角为 0°。此时天线朝天，太阳主要照射面板，但由于太阳高度角为 37°，会使下部分外环背架被太阳照射，温度较高；其余部分面板被太阳照射，背架被面板遮挡，温度较低。又由于 3 ~ 4 级东北风的影响，会使图中左上部温度相比下部较低 (见图 8 a))，所以除了下部外环外，结构温差小。

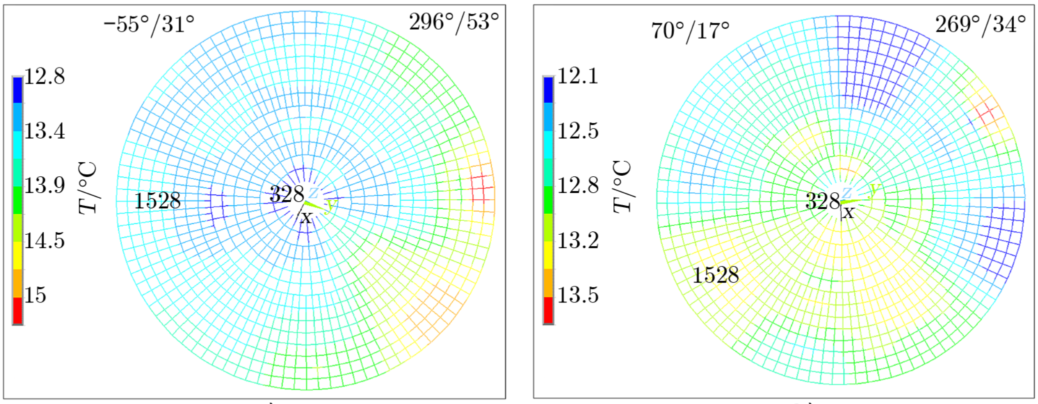


注：a) 晴天；b) 雨天。

图 8　12:00 天线朝天时 (俯仰角 88°) 背架上弦杆温度场情况

2021 年 12 月 15 日 12:00，小雨，东风 3 ～ 4 级，天马望远镜处于静止，天线为朝天状态，方位角为 189°，太阳高度角为 36°，太阳方位角为 0°。此时太阳主要照射面板，但由于下雨，整体温度较均匀，结构温差小 (见图 8 b)) 。又由于吹东风，图中结构左侧温度略高于右侧。

2022 年 3 月 1 日 9:00，阴天，微风，天马望远镜处于正常运行状态，天线俯仰角 53°，方位角为 296°，太阳高度角为 31°，太阳方位角为 −55°。由天线俯仰角与太阳高度角的大小可知，太阳部分照射在背架，部分照射在面板，图中结构右部太阳直接照射，温度较高；而左部被俯仰结构遮挡，温度相对较小，内部几环被俯仰结构遮挡，温度较低且均匀。另外，由于是阴天，所以结构整体温差较小 (见图 9 a))。



注：a) 09:00；b) 16:20。

图 9　同一天不同时刻背架上弦杆温度场情况

2022 年 3 月 1 日 16:20，阴天，微风，天马望远镜处于正常运行状态，天线俯仰角为 34°，方位角为 269°，太阳高度角为 17°，太阳方位角为 70°。此时太阳照射方向与天线口径平面接近垂直，且照射在面板上，所以背架结构温度分布较均匀 (见图 9 b))。

综上分析，可得出天线背架结构上温度高低与太阳方位角、高度角、风速大小、天线俯仰角与方位角等有很大关系。太阳照射到背架时温度会较高，若照射在面板上，温度相对较低。由图 8 与图 9 可知，结构的内部几环被俯仰结构遮挡，在任意状态下温度较低且均匀；外部几环直接被太阳照射的，温度较高。而在有较强风的作用下，由于天线背架表面的对流换热系数随风速的增加而增加，导致迎风面结构的温度会有所下降；在雨天时，整体温度较均匀，温差小。

4.3　背架结构温度效应

背架暴露在阳光和阴影下的部分可能具有显著的温差，这就会导致显著的热变形。运用距离反比加权插值公式，可通过任意时刻的传感器测量数据，得出该时刻天线结构背架上的温度场，从而进行温度效应分析。本节将分析结构上的最大和最小温差，并估算最大温差对望远镜焦距和指向的影响。

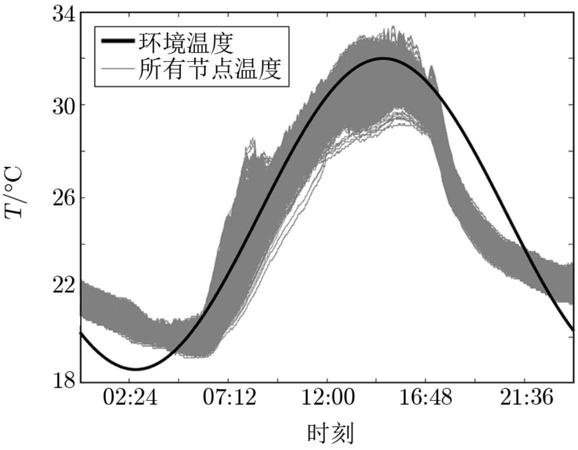
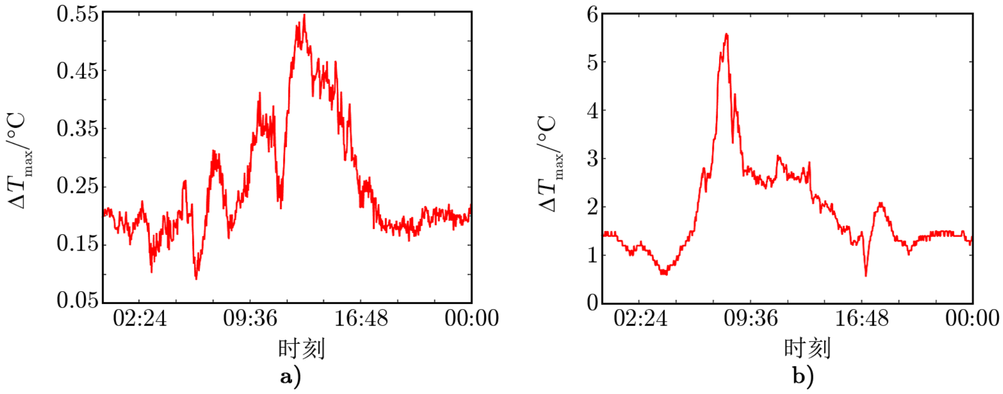


图 10 背架上弦温度与环境温度情况

由于开放式的背架暴露于空气环境之中，背架温度则与环境温度、太阳直接照射以及风速等有关。首先，分析节点温度与环境温度的关系，选择 2021 年 10 月 1 日进行分析阐述，由环境温度的计算模型[8]获得的温度变化曲线如图 10 中的实线所示，60 个节点的温度变化见图 10 中的灰线，可以看出背架上节点温度与天线周围环境的温度大趋势上变化是一致的，8:00 左右个别节点温度突出，是由于太阳照射引起的节点温度上升；晚上，结构以红外长波辐射为主，温度下降速度比环境温度更快。

其次，计算结构温差引起的焦距误差和指向误差。通过得到的背架节点温度，可知高度方向、直径方向的节点温差随时间的变化 (见图 11)，其中高度方向与直径方向如图 12 所示。从图可知，在夜间，高度、直径方向上的温度随时间变化的梯度很小，可忽略不计；白天的梯度至少增加了 2 至 3 倍。由于高度方向温度梯度的存在，会使天线产生焦距误差，焦距变化的值为 $\Delta f = 2f^2\alpha\Delta T/t$；而直径方向上的温度梯度会导致指向误差[9,10]，这个指向误差为 $\Delta\theta = \alpha t\Delta T/(2D)$。以 2021 年 10 月 1 日数据为例，根据天马望远镜相关设计参数，焦距 $f = 20.8$ m，钢的热膨胀系数 $\alpha = 12\times10^{-6}$/°C，背架上肋的高度 $t = 5$ m。在高度方向上最大温差 $\Delta T = 0.55$°C，由简化模型计算得焦距误差为 1.14 mm；在直径方向最大温差 $\Delta T = 5.6$°C，会产生 $\Delta\theta = 0.53''$ 的指向误差。



注：a) 高度方向；b) 直径方向。

图 11 高度方向、直径方向的节点温差随时间的变化

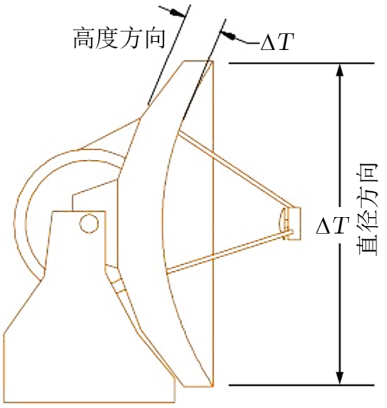


图 12　高度方向与直径方向示意图

5 结　论

针对天马望远镜背架结构上的温度场问题，本文利用少量的温度传感器结合距离反比加权插值方法获得整个背架结构的温度场，并对各种姿态及天气状况下的温度场进行分析。

(1) 优化了插值方法中幂指数 k 和距离 d_i 的取值，通过传感器相互之间的交叉验证，得出插值精度。

(2) 分析了天线结构背架温度分布与太阳方位角、高度角及天气之间的联系。太阳照射到背架时，被照射到的节点温度较高，若照射在面板上，背架温度分布较均匀；结构的内部几环被俯仰结构遮挡，在任意状态下温度较低且均匀分布，外部几环直接被太阳照射的部分，温度较高；在雨天时，整体温度较均匀，温差在 2°C 以内。

(3) 分析背架结构温差的变化，并通过简化模型估算背架高度和直径方向的温差引起的焦距误差及指向误差，进一步将通过有限元分析进行验证。

参考文献：

[1] Greve A, Bremer M. Thermal design and thermal behaviour of radio telescopes and their enclosures. Springer Science & Business Media, 2010: 364
[2] 王从思, 王娜, 连培园, 等. 高频段大型反射面天线热变形补偿技术. 北京: 科学出版社, 2018: 9
[3] Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. IEEE transactions on antennas and propagation, 2005, 53(2): 851
[4] 连培园, 朱敏波, 王伟, 等. 机械工程学报, 2015, 51(06): 165
[5] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 地理研究, 2004, 23(03): 357
[6] 何涛, 张武, 李玲, 等. 石油天然气学报, 2010, 32(02): 213
[7] 钟杰. 硕士论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012
[8] Banyal R K, Ravindra B. New Astronomy, 2011, 16(5): 328
[9] Lamb J W. Thermal considerations for mmA antennas[J]. mmA Memo Series, 1992: 83
[10] 程景全. 天文望远镜原理和设计. 南京: 南京大学出版社, 2020: 521

Thermal Analysis of Antenna Backup Structure Based on Interpolation Method

LI Wang[1], FU Li[2,4], WANG Xu[1], LIU Hai-ming[3], LIU Qing-hui[2,4], TANG Jian-sen[1]

(1. Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chongqing 400074, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co. ltd., Chongqing 400067, China; 4. Key Laboratory of Radio Astronomy Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The antenna backup structure (BUS) of a large radio telescope has the characteristics of complex structure and many nodes. If the temperature field of the antenna BUS can be reconstructed more accurately, it will be of great help to analyze the thermal deformation of the BUS. In this paper, a certain number of sensors are installed on the antenna structure to measure the temperature value of the specified position, and the temperature field of the BUS is reconstructed by using the inverse distance weighted (IDW) interpolation method and these discrete temperature values, and analyze the temperature field under different attitudes. The effect of the IDW interpolation is related to the distance calculation method, the distance exponent and the search radius. The IDW interpolation method is optimized by cross-validation, so that the accuracy is better than 0.5°C. In addition, the temperature field of the BUS at any time can be obtained by the interpolation method, and the temperature field of the BUS under different states can be analyzed to obtain the factors that affect the distribution of the temperature field, as well as the focal length error and pointing error caused by the temperature difference in different directions to the antenna.

Key words: temperature sensor; interpolation method; interpolation accuracy; temperature field; temperature difference